J. Lake Sci.(湖泊科学), 2026, 38(3):000-000
DOI 10.18307/2026.0317

滇池表层沉积物甾醇空间分布特征及生态环境意义*

周冰倩[1]，张晓楠[1**]，张灿[2**]，牛豪格[1]，牛婷雨[1]，冷铭睿[1]，赵翔宇[1]，王启睿[1]，贺信[1]，杨骁羿[1]，陈 亮[1]，张虎才[1]

（1：云南大学 生态与环境学院 高原湖泊生态与治理研究院 云南省河湖水系生态保护与资源利用重点实验室（筹），昆明 650500）

（2：中国科学院南京地理与湖泊研究所 湖泊与流域水安全全国重点实验室，南京 210008）

摘 要：滇池作为我国典型的高原淡水湖泊，近年来受人类活动和外源营养物质持续输入的影响，富营养化问题日益突出。甾醇作为沉积物中重要的有机分子标志物，能够有效指示有机物质的来源及受人类活动影响的程度。为探明滇池表层沉积物甾醇的组成特征及来源，本研究基于多点采样，系统分析了沉积物中甾醇类分子标志物、总有机碳（TOC）、总氮（TN）及C/N等地球化学指标的空间分布特征，并结合流域土地利用类型进行系统分析。结果表明，滇池表层沉积物有机质含量及C/N空间分布差异显著，滇池草海区域受城市径流和河流汇入影响，有机质及C/N值均高于外海，且表现出东北低、西南高的空间分布格局，滇池外海区域湖心深水区有机质含量和C/N值高于湖滨浅水区。甾醇分子标志物分析显示，粪甾醇及其差向异构体（C_{27}型）主要分布于草海及外海东北部和南部，反映区域生活污水等外源输入显著；胆固醇和二氢胆固醇（C_{27}型）则富集于草海北部、外海中部与外海南部，指示浮游生物对内源有机质的贡献；菜油甾醇（C_{28}型）、豆甾醇和β-谷甾醇（C_{29}型）在农业活动密集，耕地面积占比大的外海中部和外海南部相对富集，受农业活动影响较强；甲藻甾醇（C_{30}型）在外海南部显著富集，反映该区域甲藻类生物量大；水动力条件也是影响有机质含量和甾醇空间分布的重要因素，在水体封闭，水动力较弱的草海区域，各有机指标均呈现高值，而水深变化剧烈，水动力扰动较强的海口-石头村断裂带，各有机指标含量均呈现低值。本研究基于甾醇类分子标志物系统识别了滇池沉积物中多源有机质的空间分布格局，明确区分了内源、外源输入特征，不仅拓展了湖泊有机质来源解析的技术路径，也为复杂水体富营养化机制研究与污染溯源治理提供了技术支持。

关键词：滇池；沉积物；甾醇类标志物；有机质来源；生活污水；农业活动输入

Spatial Distribution and Sources of Sterols in Surface Sediments of Lake Dianchi

Zhou Bingqian[1]，Zhang Xiaonan[1]，Zhang Can[2]，Niu Haoge[1]，Niu Tingyu[1]，Leng Mingrui[1]，Zhao Xiangyu[1]，Wang Qirui[1]，He Xin[1]，Yang Xiaoyi[1]，Chen Liang[1]，Zhang Hucai[1]

(1: Yunnan Key Laboratory of Ecological Protection and Resource Utilization of River-lake Networks, Institute for Ecological Research and Pollution Control of Plateau Lakes, School of Ecology and Environmental Sciences, Yunnan University, Kunming 650500, P.R.China)

(2: Key Laboratory of Lake and Watershed Science for Water Security, Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, P.R.China)

Abstract: Lake Dianchi, a representative plateau freshwater lake in China, has experienced escalating eutrophication in recent decades, largely driven by intensified anthropogenic activities and sustained nutrient inputs. To elucidate the composition and sources

* 2025-06-16 收稿;2025-08-31 收修改稿。
国家自然科学基金项目(42361025,U2202207)、云南省基础研究专项(202301AU070191,202401AT070478)和兴滇英才支持计划(XDYC-QNRC-2023-0356)联合资助。
** 通信作者;E-mail：zhangxn@ynu.edu.cn;czhang@ niglas.ac.cn。

of sterols in surface sediments, we conducted systematic multi-site sampling and analyzed the spatial distribution of sterol biomarkers, total organic carbon (TOC), total nitrogen (TN), and C/N ratios in relation to watershed land use. Results revealed pronounced spatial heterogeneity in organic matter content and C/N ratios. The Caohai region, influenced by substantial urban runoff and multiple inflowing rivers, showed higher organic matter content and elevated C/N ratios relative to Waihai, following a distinct southwest-to-northeast decreasing gradient. Within Waihai, deeper central zones exhibited greater organic matter and higher C/N ratios than peripheral shallow areas, forming a center-high, margin-low spatial pattern. Coprostanol and its epimer (C27) were concentrated in Caohai and the northeastern and southern parts of Waihai, indicating substantial sewage and anthropogenic inputs. Cholesterol and cholestanol (C27) were enriched in northern Caohai, central Waihai, and southern Waihai, reflecting autochthonous organic matter derived from plankton. Campesterol (C28), stigmasterol, and β-sitosterol (C29) were relatively enriched in central and southern Waihai—areas with intensive agriculture and high cropland coverage—suggesting strong agricultural influence. Dinosterol (C30) was notably concentrated in southern Waihai, consistent with high dinoflagellate biomass in this region. Hydrodynamic conditions also played a critical role: in the semi-enclosed, low-energy Caohai region, all organic indicators showed high values, whereas the Haikou–Shitoucun fault zone, characterized by large water-depth variations and strong hydrodynamic disturbance, exhibited low concentrations of organic matter and sterols. This study systematically characterizes multiple organic matter sources in Lake Dianchi sediments using sterol biomarkers, clearly differentiating autochthonous and allochthonous contributions. The results advance methodological approaches for organic matter source apportionment and provide a theoretical basis for understanding eutrophication mechanisms and tracing pollution sources in complex aquatic systems.

Keywords: Lake Dianchi; Sediments; Sterols biomarkers; Sources of organic matter; Sewage pollution; Agricultural inputs

自工业革命以来，经济社会的快速发展极大的加剧了人类对自然环境的干扰，湖泊生态系统普遍面临着水体污染、富营养化和生态功能退化等严峻挑战。2023 年中国生态环境状况公报指出，我国 205 个重要湖泊（水库）中，中营养水体（64.4%）和富营养水体（27.3%）总占比高达 91.7%[1]，其中以云南高原湖泊为代表的湖泊系统，尤为突出地表现出水资源短缺、水质恶化和富营养化问题[2-6]。滇池作为云南省面积最大、经济社会活动最为密集的典型高原淡水湖泊，其生态环境变化一直备受关注，《滇池保护治理“十四五”规划》指出，滇池因半封闭型湖泊特征导致外源污染物滞留，长期面临富营养化与有机污染问题，严重威胁区域水生态安全[7]。因此，系统厘清滇池沉积物中多源有机质的时空分布格局及其对人类活动的响应特征，对于深化湖泊富营养化形成机制的认识，并为科学治理提供数据支持与理论基础，具有重要现实意义。

湖泊沉积物作为有机质和污染物的主要汇集库，是解析湖泊历史环境变化和污染过程的“天然档案”。沉积物中有机质的组成与来源不仅反映了流域自然过程与人类活动的耦合效应，也是湖泊富营养化机制研究和制定污染防控措施的重要依据。甾醇类化合物因其结构多样、来源特异且环境稳定性强，已被广泛应用于湖泊有机质来源解析、污染溯源及生态环境评价，特别是在评估由污水衍生的有机物污染方面，已经取得了显著成效[8-14]。通过对甾醇组成和丰度的分析，研究者不仅能够揭示自然过程和人为活动对湖泊环境的影响，还能更准确地识别和追踪污染物的输入来源及其传输路径。甾醇因其结构多样、来源特异且环境稳定性强，已成为区分陆地植物与藻类来源[15]，评估湖泊历史营养状态[11]，指示生活污水污染与人类活动强度的重要手段[16-17]。近年来，甾醇类化合物被广泛应用于湖泊和河口沉积环境研究，特别是在有机质来源解析、污染溯源及生态环境评价方面。由于其在不同生物类群中的类型和比例存在显著差异，因此成为区分湖泊沉积物中外源、水生植物、藻类及动物输入的有效分子标志物[18]。

例如，粪甾醇（coprostanol）、差向异构粪甾醇（epicoprostanol）由胆固醇的氢化作用形成，主要源于人类及草食性动物的消化过程，它们是生活污水和动物粪便污染的经典标志物，在海岸带和湖泊沉积物中与污染源强度密切相关[19]，可指示人类或动物粪便输入[20]；湖泊环境中的胆固醇（cholesterol）、二氢胆固醇（cholestanol）多源于动物和浮游植物；菜油甾醇（campesterol）通常是水生藻类和部分高等植物的特征性分子标志物[9,21-22]，胆固醇/菜籽甾醇可作为反映湖泊营养状态变化的重要指标，能够揭示不同环境条件下水体富营养化的趋势[23]；豆甾醇（stigmasterol）和 β-谷甾醇（β-sitosterol）主要反映陆

地高等植物输入[9]；甲藻甾醇（dinosterol）则具有特异性，指示甲藻来源[8-11,24-26]，可以反映水体甲藻的生产力变化。

尽管甾醇类化合物已在湖泊沉积物中广泛应用，然而，目前针对滇池表层沉积物中甾醇种类、空间分布及来源的系统研究尚不充分，尤其是甾醇分子标志物与碳氮地球化学参数和流域土地利用类型联用的研究相对匮乏，且在滇池富营养化污染溯源和有机质来源解析中的应用仍有待深入。基于此，本文以滇池表层沉积物为研究对象，系统分析湖泊不同区域沉积物中多种甾醇的分布特征，结合 TOC、TN 及 C/N 等地球化学指标以及滇池流域土地利用类型，探讨滇池沉积有机质的组成及其潜在来源，进一步揭示甾醇分子标志物在高原湖泊富营养化诊断与污染溯源中的地球化学指示意义。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

滇池（24°40′~25°02′N，102°36′~102°47′E）位于云南省中部，是云贵高原湖泊群中面积最大、经济社会活动最为密集的淡水湖泊（图 1a）。2023 年云南省统计年鉴显示，滇池平均湖面海拔约 1887.5 m，湖泊面积为 309.5 km^2，湖泊最大水深 11.3 m（平均水深 5.3 m），总需水量 15.60×10^8 m^3，集水面积为 2920 km^2[27]，湖区呈东北—西南向展布，湖岸线曲折，湖盆形态复杂（图 1b）。滇池属亚热带高原季风气候，据云南省昆明气象站资料显示，1993~2023 年期间，滇池附近的年均温约为 16.1℃，7 月和 1 月的平均温度分别为 20.6℃ 和 9.5℃。年均降水量约 999.5 mm，月平均降水量约 79.59 mm，其中主要集中在 5~10 月。流域内河网密布，主要入湖河流包括盘龙江、海河、宝象河、马料河、捞鱼河等，这些河流携带大量营养盐及污染物输入湖泊，影响着滇池的水质和生态环境[28]。

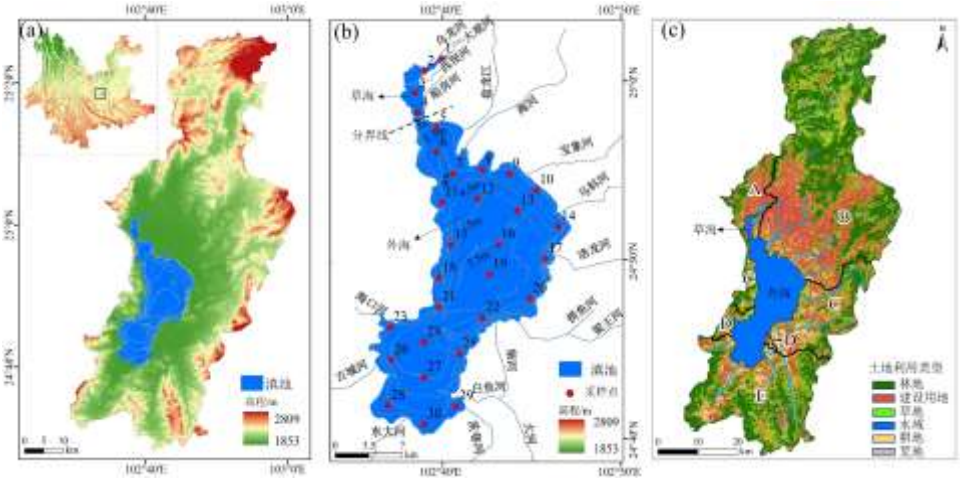

图 1 滇池地理位置、采样点位和土地利用情况示意图

（a）云南省高程图和滇池所在位置；（b）滇池表层沉积物采样点位；（c）滇池土地利用以及滇池流域分区情况，林地（33.66%）、建设用地（27.42%）、草地（16.80%）、水域（10.56%）、耕地（7.82%）、荒地（3.73%）

A：草海区域；B：外海东北部；C：外海中部；D：海口-石头村断裂带；E：外海南部

Fig.1 Geographic location, sampling sites, and land use in Lake Dianchi. (a) Elevation map of Yunnan Province with the location of Lake Dianchi; (b) Sampling locations of surface sediments in Lake Dianchi; (c)Land use and sub-basin divisions in the Lake Dianchi watershed: Forest (33.66%), urban Land (27.42%), Grassland (16.80%), Water Body (10.56%), Cropland (7.82%), Barren Land (3.73%)

A: Caohai Area; B: Northeast Outer Lake; C: Central Outer Lake; D: Haikou-Shitou Village Fault Zone; E: South Outer Lake

依据水动力和功能区滇池可分为草海（北部）和外海（南部）两大水体单元，以海埂大堤为界，外海面积较大，水体交换能力较强，是滇池的主体水域，草海面积较小，水体流动性弱，易受外源污染和有机物富集影响。近年来，随着昆明市城市化进程加快和人口密度增加，滇池流域生活污水、工业废水

及农业面源污染持续输入，导致湖泊富营养化问题日益突出，特别是草海区域，成为外源污染和有机物沉积的敏感区[29-30]。自 20 世纪 90 年代起，滇池因富营养化成为我国藻华最严重湖泊之一[31]。

滇池流域人类活动强度大，土地利用格局复杂，直接影响湖泊营养盐输入与有机质来源结构。根据 Landsat TM/ETM/OLI 遥感影像解译结果，滇池流域土地利用类型主要包括林地、建设用地、草地、水域、耕地和荒地等六类。其中林地和建设用地面积占比较高，分别约为 33.66%和 27.42%。为更好探讨土地利用与湖区沉积环境的关系，本文依据滇池水体自然分区与子流域划分，将湖区划为五个区域（图 1c），并在后续分析中提取各区域土地利用类型及其占比特征（见第 2.1 节）。

1.2 样品采集

本研究在 2023 年 6 月对滇池全湖表层沉积物进行了系统采样，采样布点充分考虑了内源和外源性影响的差异，不仅在湖心区域设置采样点，还在主要入湖河口及滇池周边不同功能区（如城市、农业和生态缓冲带等）均衡布点，以确保样品的代表性和系统性，共采集了 30 个表层沉积物样品，采样水深范围为 2~6.1 m（图 1b），其中草海区域 4 个样品，外海区域 26 个样品。所有样品采集后立即装入洁净聚乙烯袋中，在-20℃条件下冷冻保存。所有样品冷冻干燥后，先去除砂、砾和明显可见的根系、植物残体等，并研磨至 200 目备用。

1.3 生物标志物的提取与测试

冷冻干燥的沉积物筛研磨后用于提取游离脂，用 $V_{（二氯甲烷）}$：$V_{（甲醇）}$＝9：1 的混合溶液超声萃取 4 次，提取的游离脂溶解于 6%氢氧化钾-甲醇溶液室温皂化 12 h，用正己烷萃取中性组分，采用活化硅胶柱将中性脂质分别通过正己烷和 $V_{（二氯甲烷）}$：$V_{（甲醇）}$＝9：1 溶液进行淋洗，分离非极性（含烷烃、烯烃等）和极性组分（含甾醇、脂肪醇等）。其中醇馏分用双（三甲基硅烷基）三氟乙酰胺（BSTFA），并加入定量内标物雄甾醇（3β-Hydroxy-5a-androstane），在 70℃下衍生化 1.5 h 后，在 48 h 内完成 GC/MS 分析。

采用色谱-质谱联用仪（Agilent-7890A-5977B，GC-MS）进行分析鉴定[32]，仪器采用 DB-5MS（30 m × 250 μm × 0.25 μm）色谱柱检测，气相色谱条件为：气化室温度为 250°C；载气为高纯氦气；程序升温从 70°C 开始以 20°C/min 升至 110°C，以 10°C/min 升至 250°C，以 3°C/min 升至 310°C，恒温 10 min。质谱条件为 EI 离子源，离子源温度为 230°C；四极杆温度为 150°C；GC 和 MS 接口温度为 280°C。离子源电离能为 70 eV；扫描范围 50～650 amu。甾醇的鉴定根据标准样品的色谱保留时间、质谱图解和标准图谱（NISTO5L 谱库）对比确定，甾醇的含量通过替代物和内标物的使用和标准曲线的绘制来确定[33]，本研究采用内标法计算沉积物中甾醇的浓度。所有 GC-MS 分析均在中国科学院南京地理与湖泊研究所湖泊与流域水安全全国重点实验室完成。甾醇的质量浓度（以 μg/g 干重计）计算公式如下：

$$C_x\left(\frac{\mu g}{g}\right) = \left(\frac{\frac{A_x}{A_{IS}} \times C_{IS} \times V}{m}\right)$$

式中，C_x为样品中甾醇的浓度；A_x、A_{IS}分别为样品中待测甾醇和内标（雄甾醇）的峰面积；C_{IS}为内标工作液浓度；V为样品萃取后的定容体积；m为样品干重。

1.4 碳氮分析

对烘干称重后的沉积物进行酸化处理，以去除无机碳酸盐，将样品冷冻干燥并研磨并称重后用锡舟包好待测。采用德国元素 Elementar 公司的 Vario ISOTOPE cube 分析仪，测定有机碳（TOC）、总氮（TN）含量，并计算有机碳与总氮的比值（C/N）。

2 结果

2.1 土地利用类型空间分布特征

本研究以 Landsat TM/ETM/OLI（分辨率 30 m）遥感影像为主要数据源，经过影像融合、几何校正、图像增强与拼接等处理后，通过人机交互目视解译的方法，将根据国家标准《土地利用现状分类》将滇

池流域原始土地利用类型数据划分为林地、建设用地、草地、水域、耕地、荒地这 6 类一级土地利用类型（图 1c）。其土地利用面积占比由大到小为：林地（33.66%）、建设用地（27.42%）、草地（16.80%）、水域（10.56%）、耕地（7.82%）、荒地（3.73%）。

为进一步分析不同湖区土地利用结构差异，依据滇池水体自然分区与子流域划分结果，将湖区划分为草海、外海东北部、外海中部、海口-石头村断裂带、外海南部 5 个子区域，在图中分别命名为 A、B、C、D、E（图 1c）。采用 ArcGIS 中的空间叠加分析（Intersect）将土地利用类型图层与滇池分区图层叠加，提取各子区域内土地利用空间分布信息。随后，利用字段计算器与统计工具（Summary Statistics），分别计算各类土地利用的面积及其在各子区域中的占比。其中草海流域土地利用面积占比由大到小为：建设用地（51.80%）、林地（25.10%）、草地（12.76%）、耕地（9.88%）、荒地（0.34%）、水域（0.11%）；外海东北部流域土地利用面积占比由大到小为：林地（40.23%）、建设用地（31.80%）、草地（17.44%）、荒地（5.25%）、耕地（5.05%）、水域（0.24%）；外海中部流域土地利用面积占比由大到小为：建设用地（30.67%）、林地（26.82%）、草地（22.18%）、耕地（17.38%）、荒地（2.48%）、水域（0.48%）；海口-石头村断裂带流域土地利用面积占比由大到小为：建设用地（30.10%）、（29.40%）、林地（23.60%）、耕地（13.46%）、草地荒地（2.49%）、水域（0.94%）；外海南部流域土地利用面积占比由大到小为：林地（41.44%）、建设用地（22.84%）、草地（20.33%）、耕地（11.54%）、荒地（3.60%）、水域（0.27%）。

2.2 滇池表层沉积物样品 TOC、TN 和 C/N 比值

滇池表层沉积物样品中 TOC、TN、C/N 整体呈现出显著的空间分异特征，草海 TOC、TN、C/N 三项指标均显著高于外海区域（图 2）。为验证该差异的统计学显著性，本文采用非参数的 Mann-Whitney U 检验对草海与外海两个区域的样品数据进行了比较。结果显示，TOC（p=0.003）、TN（p=0.035）及 C/N（p=0.002）均通过了显著性检验（p<0.05）。

其中，全湖 TOC 含量范围为 0.44%~26.4%，草海区域为 6.64%~26.4%，显著高于外海区域（0.44%~7.16%，图 2a）；全湖 TN 含量范围为 0.09%~2.26%，草海区域为 0.67%~2.66%，也显著高于外海区域（0.27%~1.04%，图 2b）；全湖 C/N 比值范围为 4.9~11.70，草海为 9.26~11.70，外海为 4.9~7.64（图 2c）。此外，对滇池表层沉积物中的 TOC 和 TN 进行相关性分析，二者呈显著正相关（R^2=0.94，n=30，p<0.01），表明沉积物中的氮主要以有机氮形式存在，且其来源与有机质来源密切相关[29]。

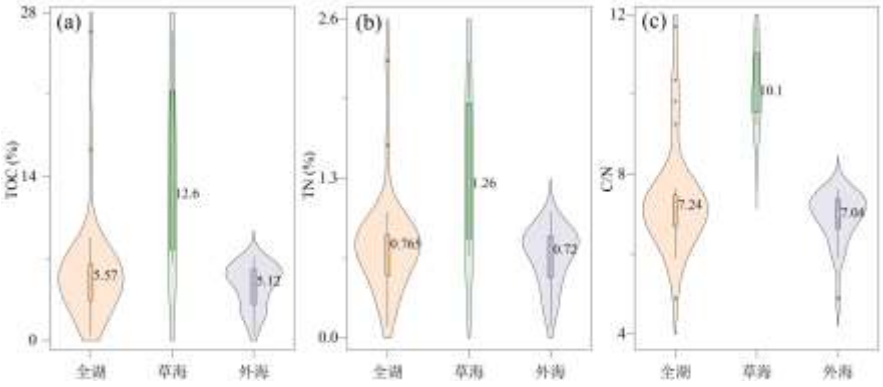

图 2 滇池表层沉积物中不同湖区（a）TOC；（b）TN；（c）C/N 小提琴图

Fig.2 Violin plots of (a) TOC, (b)TN, (c) C/N in surface sediments from different regions Lake Dianchi

2.3 滇池表层沉积物甾醇组成特征

滇池表层沉积物中检出 C_{27}~C_{30} 系列生物型甾醇共 9 种（图 3a），其中检测到的 C_{27} 型生物甾醇包括粪甾醇、差向异构粪甾醇、胆固醇和二氢胆固醇，C_{28} 型生物甾醇为菜油甾醇，C_{29} 型生物甾醇包括豆甾醇、β-谷甾醇和谷甾烷醇，C_{30} 型生物甾醇为甲藻甾醇，并通过气相色谱-质谱法，基于三甲基甲硅烷基类固醇衍生物的特征离子和保留时间，对以上甾醇进行了鉴定（图 3b）。

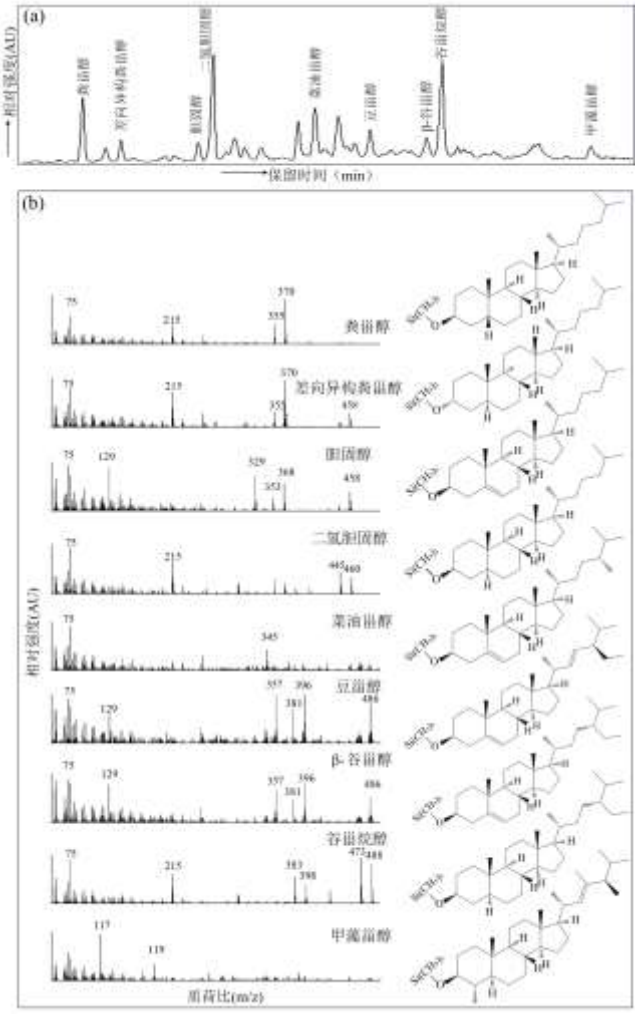

图 3 滇池表层沉积物中（a）有机质样品的甾醇色谱质谱图；（b）各甾醇的 TMS 衍生物质谱及其化学结构式

Fig.3 (a) Chromatograms and mass spectra of sterols in organic matter samples from surface sediments of Lake Dianchi; (b) Mass spectra of TMS derivatives of various sterols and their chemical structures.

C_{27} 甾醇中，粪甾醇浓度范围为 0.04~5.54 μg/g，占总甾醇的 0.7%~21.4%；差向异构粪甾醇浓度范围为 0~1.58 μg/g，占总甾醇的 0%~7.6%；胆固醇浓度范围为 0.24~2.55 μg/g，占总甾醇的 3.5%~40.0%；二氢胆固醇浓度范围为 0.17~8.90 μg/g，占总甾醇的 2.6%~48.2%。C_{28} 甾醇的菜油甾醇浓度范围为 0.02~0.102 μg/g，占总甾醇的 0.3%~5.2%；C_{29} 甾醇中，豆甾醇浓度范围为 0.07~2.36 μg/g，占总甾醇的 0.7%~13.9%；β-谷甾醇浓度范围为 0.23~4.39 μg/g，占总甾醇的 4.8%~25.8%；谷甾烷醇浓度范围为 0.1~11.28 μg/g，占总甾醇的 1.5%~33.7%；C_{30} 甾醇的甲藻甾醇浓度范围为 0~1.5 μg/g，占总甾醇的 0%~11.7%。

滇池表层沉积物中不同类型甾醇浓度小提琴图显示，粪甾醇与差向异构粪甾醇均在草海中浓度最高，外海最低，且两者小提琴图具有相似的形态，表明两者可能来源一致（图 4a-b）。胆固醇和二氢胆固醇在全湖、草海、外海之间差异相对较小，呈现出整体均衡的分布模式，但外海区域的中位值与上限略低于草海（图 4c-d）。菜油甾醇的浓度在草海中富集，外海浓度低，但外海中存在一些较高的离群值（图 4e）。豆甾醇则呈现中等程度的空间分异，草海略高于其他区域（图 4f）。β-谷甾醇、谷甾烷醇在草海中浓度显著高于其他区域，外海中位值浓度较低（图 4g-h）。相比之下甲藻甾醇在三个区域中分布相对均衡，差异不显著（图 4i）。

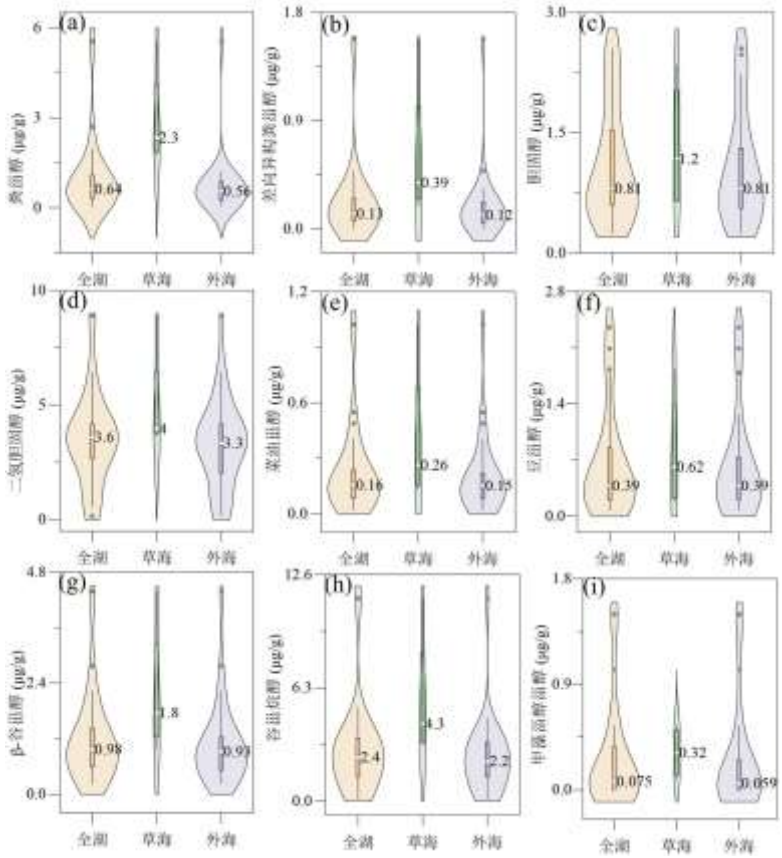

图 4 滇池表层沉积物中不同类型甾醇浓度（μg/g）不同湖区小提琴图

（a）粪甾醇；（b）差向异构粪甾醇；（c）胆固醇；（d）二氢胆固醇；（e）菜油甾醇；

（f）豆甾醇；（g）β-谷甾醇；（h）谷甾烷醇；（i）甲藻甾醇

Fig. 4 Violin plots of concentrations (μg/g) of different types of sterols in surface sediments from various regions Lake Dianchi :

(a) coprostanol; (b) epicoprostanol; (c) cholesterol; (d) cholestanol; (e) campesterol;

(f) stigmasterol; (g) β-sitosterol; (h) stigmastanol; (i) dinosterol

3 讨论

3.1 滇池表层沉积物有机质空间分布特征与影响因素

滇池草海表层沉积物 TOC、TN 及 C/N 显著高于外海，且表现出西南高东北低的空间分布特征，这主要由于滇池草海被昆明主城区包围，区域人口密度大、建设用地面积高达 51.80%，受人类活动影响大，且入湖河流乌龙河、大观河、西坝河和船房河自东北向西南注入草海，至草海南部遇海埂大堤阻拦，水动力减弱，有机物和藻类在草海西南部堆积（图 5）。滇池草海的水质研究结果也显示，草海各水域水质参数（如总氮、总磷、氨氮、化学需氧量等）普遍表现为自北低南高的空间分布特征，草海南部为污染最重区域[34]。

外海 TOC 和 TN 具体呈现出草海、外海中部、外海南部区域含量较高，而在草海与外海连接处、外海东北区、外海南部边缘及海口—石头村断裂带附近（采样点 21、25）等浅水区域，TOC 与 TN 均为低值（图 5a-b）。由于浅水区域水深浅，波浪破碎作用显著，形成强烈的拍岸浪和向湖心的回流过程，使得该区域水动力较强，不利于有机质的沉积与保存，随着水深的增加，水动力特征发生显著转变，拍浪带外的深水区水动力显著减弱[35]，有利于有机物的沉积，导致 TOC 和 TN 含量较高。而海口-石头村断裂带中间存在漏斗状下陷区，水深变化剧烈，水动力强，不利于有机质的沉积[36]。

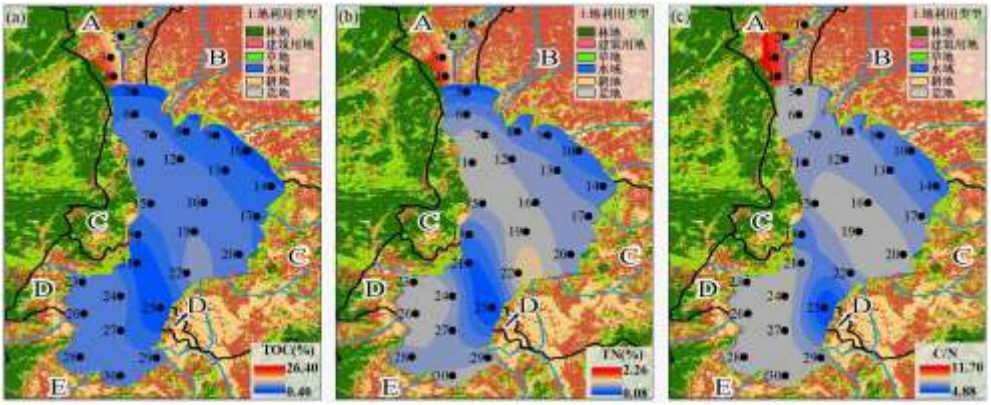

图 5 滇池表层沉积物中（a）TOC（%）；（b）TN（%）；（c）C/N 空间分布图

A：草海区域；B：外海东北部；C：外海中部；D：海口-石头村断裂带；E：外海南部

Fig.5 Spatial distribution maps of (a) TOC (%); (b) TN (%); (c) C/N ratio in surface sediments Lake Dianchi

A: Caohai Area; B: Northeast Outer Lake; C: Central Outer Lake; D: Haikou-Shitou Village Fault Zone; E: South Outer Lake

滇池表层沉积物 C/N 介于 4.9~11.70，其空间分布特征与 TOC 和 TN 类似，具有明确的地理分异性。表现为草海高、外海低的特征，其中外海与草海连接处、外海中部、外海南部高，外海东北部（点位 9、10、14）和海口-石头村断裂带低（图 5c）。通常，陆地高等植物（如维管束植物）有机质由于纤维素和木质素含量较高，C/N 比值较高，一般大 20[37]，而水生生物有机质 C/N 比值小于 20[38]。滇东湖泊水生植物和浮游生物碳、氮的结果显示，水生植物（沉水、漂浮植物）C/N 值在 15~18 之间，浮游植物和浮游动物 C/N 无显著差异，在 6~8 之间[39]。本文研究发现，在草海区域，尤其是草海南部区域 C/N 比值大于 10，但小于 12，表明草海南部沉积物中有机质以水生植物来源为主[40]。而草海北部和外海区域 C/N 比值较低，尤其是外海区域 C/N<8，则表明沉积物有机质来源以浮游植物和浮游动物为主。

3.2 滇池表层沉积物甾醇空间分布和生态环境指示意义

3.2.1 C_{27} 型粪甾醇、差向异构粪甾醇与生活污水 粪甾醇主要来源于人类和高等动物粪便排泄物，是指示生活污水及粪源污染输入的特征性分子标志物[17,23,41-42]，差向异构粪甾醇为粪甾醇在环境中经历微生物还原转化后的产物。C_{27} 甾醇中的粪甾醇、差向异构粪甾醇在草海北部、外海东北部、外海南部等区域均出现高值分布（图 6a），与高 TOC、TN 区域对应（图 5a-b）。其中草海及外海东北部位于昆明主城区周边，人口密集，建筑用地占比分别为 51.80%、31.80%，且入湖河渠密集，部分污水处理设施负荷较重或存在溢流现象[43]，导致大量生活源污染物通过地表径流进入湖体，使得城市生活污水中的粪甾醇通过雨季径流或管网渗漏进入湖体，显著提升了该区域沉积物中粪甾醇含量，其中相关性分析进一步验证了这一推论，粪甾醇与建设用地面积占比呈显著正相关（r=0.90，p=0.035）。相较之下，差向异构粪甾醇在全湖分布普遍偏低，仅在草海北部表现出局部高值（图 6b），由于草海北部作为昆明主城区的重要汇水区，受多源排放及历史污染沉积影响，其呈现异常高值，可能反映了旧有污染残留或污水处理效率不稳定造成的间歇性污染输入。

3.2.2 C_{27} 型胆固醇和二氢胆固醇与浮游生物 胆固醇（C_{27}）主要来自浮游动物和淡水藻类[9,23]。C_{27} 甾醇中的胆固醇和二氢胆固醇均在在草海北部、外海中部和外海南部区域呈现高值分布（图 7）。从具体浓度值来看，其中草海区域的胆固醇和二氢胆固醇表现北高于南的分布格局，这与草海沉积物中有机质 C/N 表现北低于南的分布格局相反，指示了草海北部沉积物有机质以浮游植物或浮游动物贡献为主，草海南部沉积物有机质以水生植物来源为主（图 5c，图 6c-d）。这与滇池沉水植物调查结果相一致，在草海北部沉水植物群落总覆盖度小于 2%，远低于草海南部的 20%[44]。因此，滇池沉积物中胆固醇和二氢胆固醇可以指示湖泊浮游生物来源有机质的贡献。

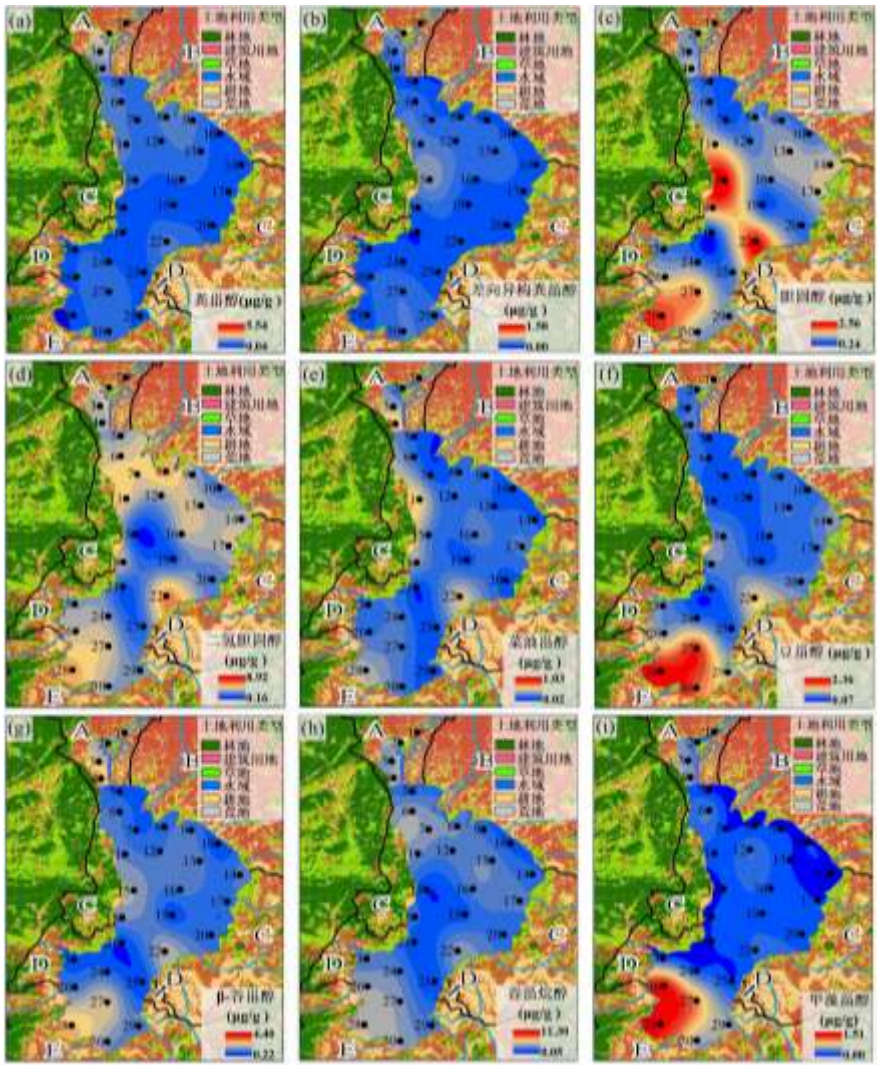

图 6 滇池表层沉积物中（a）粪甾醇；（b）差向异构粪甾醇；（c）胆固醇；（d）二氢胆固醇；（e）菜油甾醇；（f）豆甾醇；（g）β-谷甾醇；（h）谷甾烷醇；（i）甲藻甾醇含量空间分布图

A：草海区域；B：外海东北部；C：外海中部；D：海口-石头村断裂带；E：外海南部

Fig.6 Spatial distribution maps of (a) coprostanol; (b) epicoprostanol; (c) cholesterol; (d) cholestanol; (e) campesterol; (f) stigmasterol; (g) β-sitosterol; (h) sitostanol; (i) dinosterol concentrations in surface sediments Lake Dianchi

A: Caohai Area; B: Northeast Outer Lake; C: Central Outer Lake; D: Haikou-Shitou Village Fault Zone; E: South Outer Lake

3.2.3 C_{28}、C_{29} 型甾醇与农业活动 菜油甾醇（C_{28}）多源于水生藻类和部分高等植物[9,21-22]，豆甾醇（C_{29}）、β-谷甾醇（C_{29}）、谷甾烷醇（C_{29}）以陆地高等植物来源为主[9]。这四种甾醇在滇池表现出类似的空间分布格局，即在草海、外海中部、外海南部呈现高值分布，外海东北部和海口-石头村断裂带呈现低值（图 6e-h）。其中草海作为半封闭水体，水动力条件较差，有机质易于沉降积累使得菜油甾醇和豆甾醇含量较高。外海中部和外海南部区域由于地势较为平坦，水系发达，农田排水与湖泊水体之间的连通性较强，同时，该区域耕地占比相对较高，其中水田占耕地面积的 50%以上[45]，考虑到该地区主要种植蔬菜、花卉等高经济价值作物，单位面积施肥强度显著高于全国平均水平[46]，其施用的化肥和农作物残体通过地表径流进入湖泊，成为湖泊营养元素及高等植物甾醇的重要来源。相较之下，外海东北部区域和海口-

石头村断裂带的 C_{28}、C_{29} 型甾醇浓度整体偏低，几乎处于检测范围最低值附近。这是由于外海东北部区域建设用地占比高（31.80%），耕地仅占 5.05%，区域农业活动弱，高等植物来源甾醇较少；而海口-石头村断裂带水深变化剧烈（图 1b）、水动力扰动较强，不利于有机质的沉积富集。

3.2.4 C_{30} 型甲藻甾醇与藻类输入 甲藻甾醇作为 C_{30} 型甾醇的代表性分子标志物，主要来源于甲藻等浮游藻类，是反映湖泊自生有机质输入和富营养化状态的重要指标[25,47]。甲藻甾醇在外海南部区域呈现高值分布（图 6i），与胆固醇具有一致的空间分布。该区域建设用地和耕地面积占比分别为 22.82%、11.54%，生活污水与农业面源污染持续输入，导致湖泊营养盐（如总氮、总磷）浓度显著提升。沉积物 TN 含量较高（图 5b），为甲藻等浮游藻类的大量繁殖提供了充足的营养基础。外海南部水质总体优于北部区域，蓝藻水华暴发面积和强度明显低于北部[48-50]，这种差异减少了蓝藻对甲藻的竞争压力，保证了较高的水体透明度和溶氧条件，有利于甲藻等非蓝藻类群的繁殖和存活[51]。此外，外海南部区域的水体滞留时间长，尤其在西南部湖湾，水体更新速度较慢、交换能力较弱，这种较长的水力滞留时间有利于浮游藻类（包括甲藻）的聚集和持续繁殖，减少藻类随水流被带离的可能性，从而进一步促进了甲藻生物量的积累和甲藻甾醇的富集[48]。

综上所述，不同来源的甾醇在滇池沉积物中的分布特征与流域土地类型、人类活动和湖泊水动力条件密切相关，城市生活污水排放主要控制粪甾醇与差向异构粪甾醇（C_{27} 型）的分布，这些甾醇主要富集在城市人口密集、污水排放强度较高的草海北部和外海东北部区域，指示城市生活污水污染的输入和历史残留污染的持续影响。湖泊浮游生物的繁殖与分布影响胆固醇和二氢胆固醇（C_{27} 型）的分布，这两种甾醇在草海北部、外海中部和外海南部表现高值，表明这些区域沉积物有机质的来源以浮游动植物为主。农业活动（特别是高强度施肥与农田排水）主导了菜油甾醇（C_{28} 型）和豆甾醇、β-谷甾醇、谷甾烷醇（C_{29} 型）的空间分布，这些甾醇集中外海中部和外海南部区域，揭示了与农业活动相关的陆地植物甾醇的明显贡献。海口-石头村断裂带水深变化剧烈、水动力扰动较强，不利于有机质的沉积富集，有机质含量和各类甾醇含量均为全湖最低。外海南部区域甲藻甾醇的高值分布，表明湖泊水体营养盐输入与水文条件共同促进了甲藻等浮游藻类的持续繁殖和沉积。

4 结论

本研究系统分析了滇池表层沉积物中 C_{27}~C_{30} 系列甾醇的空间分布特征，并结合流域土地利用和有机质指标（TOC、TN 和 C/N），探讨了滇池甾醇来源及环境指示意义。主要结论如下：

滇池表层沉积物有机质及 C/N 空间异质性显著，草海因被昆明主城区包围、建设用地密集及多条河流自东北方向注入，导致有机质在草海西南部富集，且有机质含量远高于外海。外海区域则表现为湖滨浅水区因波浪和回流作用强烈，TOC、TN 及 C/N 均较低，而湖心深水区水动力减弱，使有机质易沉积且含量较高，海口-石头村断裂带因水深变化剧烈、水动力强，沉积物有机质含量反而较低。甾醇分析揭示了不同来源的有机质贡献：粪甾醇和差向异构粪甾醇在草海和外海东北部、外海南部呈高值分布，与高占比的建设用地区域相对应，指示生活污水的输入；胆固醇和二氢胆固醇在草海北部、外海中部和外海南部含量较高，指示浮游生物的贡献；C_{28}、C_{29} 型甾醇（菜油甾醇、豆甾醇、β-谷甾醇）在临近滇池农业主产区的外海中部和外海南部区域富集，这些区域耕地面积大、水田比例高，大量化肥和作物残体通过地表径流输入湖泊，成为高等植物甾醇的重要来源；滇池外海南部营养盐浓度高，加之水体滞留时间长、水质较优且蓝藻竞争压力小，促进了甲藻甾醇的富集，因此 C_{30} 型甾醇（甲藻甾醇）在外海南部沉积物中含量较高。

综上，甾醇分子标志物与TOC、TN、C/N和土地利用分析相结合，不仅揭示了滇池沉积物中内源、外源有机质的空间异质性，也为湖泊富营养化监测与污染源解析提供了有效工具，对滇池流域的生态治理与精准管理具有重要应用价值。

5 参考文献

[1] 中华人民共和国生态环境部. 2023 中国生态环境公报.

http://www.mee.gov.cn/xxgk2018/xxgk/xxgk15/202405/t20240527_1071365.html.

[2] Yu Y, Zhang M, Qian SQ, et al. Current status and development of water quality of lakes in Yunnan-Guizhou Plateau. *Journal of Lake Sciences*. 2010, 22(6): 820-828. DOI: 10.18307/2010.0603.[于洋, 张民, 钱善勤等. 云贵高原湖泊水质现状及演变. 湖泊科学, 2010, 22(6): 820-828.]

[3] Wang R, Dearing JA, Langdon PG, et al. Flickering gives early warning signals of a critical transition to a eutrophic lake state. *Nature*. 2012, 492(7429): 419-422. DOI: 10.1038/nature11655.

[4] Chen GJ, Shi HB, Tao JS, et al. Industrial arsenic contamination causes catastrophic changes in freshwater ecosystems. *Scientific reports*. 2015, 5(1): 17419. DOI: 10.1038/srep17419.

[5] Liu P, Zhao HJ, Wang LL. Analysis of heavy metal sources for vegetable soils from Shandong Province, China. *Agricultural Sciences in China*. 2011, 10(1): 109-119. DOI: 10.1016/S1671-2927(11)60313-1.

[6] Dong YX, Zhao L, Chen YH, et al. Succession of nine plateau lakes and regulation of ecological safety in Yunnan Province. *Ecological Economy*. 2015, 31(1): 185-191. DOI: 10.3969/j.issn.1671-4407.2015.01.039.[董云仙, 赵磊, 陈异晖等. 云南九大高原湖泊的演变与生态安全调控. 生态经济. 2015, 31(1): 185-191.]

[7] 昆明市人民政府. 昆明市人民政府关于印发滇池保护治理“十四五”规划的通知, 2022.

[8] Wang YQ, Song JM, Duan LQ, et al. Historical reconstructions of sedimentary organic matter sources and phytoplankton evolution in the Jiaozhou Bay based on sterols and carbon isotope. *Marine Pollution Bulletin*. 2021, 165: 112109. DOI: 10.1016/j.marpolbul.2021.112109.

[9] Volkman JK. Sterols and other triterpenoids: source specificity and evolution of biosynthetic pathways. *Organic Geochemistry*. 2005, 36(2): 139-159. DOI: 10.1016/j.orggeochem.2004.06.013.

[10] Li CL, Zhu LP, Ju JT, et al. Impacts of human and herbivorous feces on lake surface sediments of the Tibetan Plateau based on fecal stanol proxies. *Ecological Indicators*. 2024, 158: 111487. DOI: 10.1016/j.ecolind.2023.111487.

[11] Zhang RP, Wan NN, Yang Y, et al. The sedimentary record of organic matter source and productivity variation in Dianchi Lake during the past 70 years. *Quaternary Sciences*. 2023, 43(2): 403-411. DOI: 10.11928/j.issn.1001-7410.2023.02.09.[张汝频, 万难难, 杨余等. 近70年滇池有机质来源和生产力变化的沉积记录. 第四纪研究. 2023, 43(2): 403-411.]

[12] Sojinu SO, Sonibare OO, Ekundayo O, et al. Assessing anthropogenic contamination in surface sediments of Niger Delta, Nigeria with fecal sterols and *n*-alkanes as indicators. *Science of The Total Environment*. 2012, 441: 89-96. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2012.09.015.

[13] Tolosa I, Mesa M, Alonso-Hernandez CM. Steroid markers to assess sewage and other sources of organic contaminants in surface sediments of Cienfuegos Bay, Cuba. *Marine Pollution Bulletin*. 2014, 86(1): 84-90. DOI: 10.1016/j.marpolbul.2014.07.039.

[14] Jauković ZD, Grujić SD, Matić Bujagić IV, et al. Determination of sterols and steroid hormones in surface water and wastewater using liquid chromatography-atmospheric pressure chemical ionization-mass spectrometry. *Microchemical Journal*. 2017, 135: 39-47. DOI: 10.1016/j.microc.2017.07.011.

[15] Biache C, Philp PR. The use of sterol distributions combined with compound specific isotope analyses as a tool to identify the origin of fecal contamination in rivers. *Water Research*. 2013, 47(3): 1201-1208. DOI: 10.1016/j.watres.2012.11.037.

[16] Ortiz JE, Sánchez-Palencia Y, Torres T, et al. Lipid biomarkers in Lake Enol (Asturias, Northern Spain): coupled natural and human induced environmental history. *Organic Geochemistry*. 2016, 92: 70-83. DOI: 10.1016/j.orggeochem.2015.12.005.

[17] He YX, Chen Y, Zhang C, et al. History of anthropogenic faece and sewage contamination to lake erhai in southwestern china over the past ∼200 years. *Applied Geochemistry*. 2024, 164: 105953. DOI: 10.1016/j.apgeochem.2024.105953.

[18] Volkman JK, Jeffrey SW, Nichols PD, et al. Fatty acid and lipid composition of 10 species of microalgae used in mariculture. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*. 1989, 128(3): 219-240. DOI: 10.1016/0022-0981(89)90029-4.

[19] Wang JZ, Guan YF, Ni HG, et al. Fecal steroids in riverine runoff of the Pearl River delta, South China: levels, potential sources and inputs to the coastal ocean. *Journal of Environmental Monitoring Jem*. 2010, 12(1): 280-286. DOI: 10.1039/b909049p.

[20] Murtaugh JJ, Bunch RL. Sterols as a measure of fecal pollution. *Journal (Water Pollution Control Federation)*. 1967, 39(3): 404-409.

[21] 姚晓瑞. 新疆北部典型湖泊沉积物中甾醇分布状况及其环境行为研究[]学位论文. 石河子大学, 2013.

[22] 叶生霞. 藏北高原湖泊表层沉积物分子有机地球化学及环境意义[学位论文]. 兰州大学, 2017.

[23] Zhang YD, Liu N, Fu H, et al. Natural and anthropogenic influences on sterol geochemical characteristics in lake sediments and implications for using sterols as paleoenvironmental indicators. *Journal of Hydrology*. 2024, 634: 131146. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2024.131146.

[24] Volkman, JK. Sterols in microorganisms. *Applied microbiology and biotechnology*. 2003, 60(5): 495-506. DOI:10.1007/s00253-002-1172-8.

[25] You Y, Li JJ, Zhang EL. Application of dinosterol in marine and lacustrine environments: implication for paleoenvironment reconstruction. *Journal of Jilin University(Earth Science Edition)*. 2024, 54(3): 752-772. DOI: 10.13278/j.cnki.jjuese.20230163 [游洋, 李婧婧, 张恩楼. 甲藻甾醇在海洋和湖泊古环境重建中的应用. 吉林大学学报(地球科学版). 2024, 54(3): 752-772.]

[26] Ribeiro S, Limoges A, Massé G, et al. Vulnerability of the North Water ecosystem to climate change. *Nature communications*. 2021, 12(1): 4475. DOI: 10.1038/s41467-021-24742-0.

[27] 云南省统计局. 云南统计年鉴. 北京: 中国统计出版社, 2023.

[28] Wu DS, Cao M, Duan ZZ, et al. The variation and source-sink effect of total phosphorus flux input and output of Lake Dianchi during 2001-2018. *Journal of Lake Sciences*. 2023, 35(4): 1306-1319. DOI: 10.18307/2023.0423.[吴东少, 曹敏, 段仲昭等. 2001—2018年滇池总磷出入湖通量变化与源汇效应. 湖泊科学. 2023, 35(4): 1306-1319.]

[29] Guo HF, Chen Z, Yan H, et al. Characterization of organic pollution in the Dianchi Caohai Lake at the transition between the dry and rainy seasons. *Water Cycle*. 2024, 5: 31-36. DOI: 10.1016/j.watcyc.2024.02.001.

[30] 程庆霖. 高原湖泊沉积物有机碳、氮来源与表征. 华东师范大学, 2015.

[31] Wang JH, He LQS, Yang C et al. Comparison of algal bloom related meteorological and water quality factors and algalbloom conditions among Lakes Taihu, Chaohu, and Dianchi (1981－2015). *Journal of Lake Sciences*. 2018, 30(4): 897-906. DOI: 10. 18307/2018. 0403.[王菁晗, 何吕奇姝, 杨成等. 太湖、巢湖、滇池水华与相关气象、水质因子及其响应的比较(1981—2015年). 湖泊科学. 2018, 30(4): 897-906.]

[32] Martins CDC, Fillmann G, Montone RC. Natural and anthropogenic sterols inputs in surface sediments of Patos Lagoon, Brazil. *Journal of The Brazilian Chemical Society - JBCS*. 2007, 18(1): 106-115. DOI: 10.1590/S0103-50532007000100012.

[33] Li QL, Yuan DX, Chen M. Function and application of surrogate and internal standard in environmental sample analysis. *Marine Environmental Science*. 2002, 21(4): 46-49. DOI: 10.3969/j.issn.1007-6336.2002.04.011.[李权龙, 袁东星, 陈猛. 替代物和内标物在环境样品分析中的作用及应用. 海洋环境科学. 2002, 21(4): 46-49.]

[34] 张宇, 房晟忠, 颜翔等. 滇池草海湖体不同区域营养盐状态及影响因子分析. 2019中国环境科学学会科学技术年会, 中国陕西西安, 2019: 6.

[35] Yin ZQ, Qin XG, Wu JS, et al. Multimodal grain-size distribution characteristics and formation mechanism of lake sediments. *Quaternary Sciences*. 2008, 28(2): 345-353. DOI: 10.3321/j.issn:1001-7410.2008.02.018.[殷志强, 秦小光, 吴金水等. 湖泊沉积物粒度多组分特征及其成因机制研究. 第四纪研究. 2008, 28(2): 345-353.]

[36] Zhang HC. The potential endangers of the tectonic lake water leakage from Dianchi and water security. *Advances in Earth Science*. 2016, 31(8): 849-857. DOI: 10.11867/j.issn.1001-8166.2016.08.0849.[张虎才. 滇池构造漏水隐患及水安全. 地球科学进展. 2016, 31(8): 849-857.]

[37] Meyers PA, Ishiwatari R. Lacustrine organic geochemistry-an overview of indicators of organic matter sources and diagenesis in lake sediments. *Organic geochemistry*. 1993, 20(7): 867-900. DOI: 10.1016/0146-6380(93)90100-p.

[38] Giresse P, Maley J, Brenac P. Late Quaternary palaeoenvironments in the Lake Barombi Mbo (West Cameroon) deduced from pollen and carbon isotopes of organic matter. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*. 1994, 107(1-2): 65-78. DOI: 10.1016/0031-0182(94)90165-1.

[39] Liang H, Huang LP, Chen GJ, et al. Patterns of carbon and nitrogen stable isotopes and elemental composition of lake primary producers and zooplankton in Eastern Yunnan. *Journal of Lake Sciences*. 2018, 30(5): 1400-1412. DOI: 10.18307/2018.0521.[梁红, 黄林培, 陈光杰等. 滇东湖泊水生植物和浮游生物碳、氮稳定同位素与元素组成特征. 湖泊科学. 2018, 30(5): 1400-1412.]

[40] Wang WW, Chen JY, Wang SH, et al. Differences in the composition, source, and stability of suspended particulate matter and sediment organic matter in Hulun Lake, China. *Environmental Science and Pollution Research*. 2023, 30(10): 27163-27174. DOI: 10.1007/s11356-022-24096-0.

[41] Su NR, Emilie J, Yin YP, et al. Sedimentary organic matter of channel type reservoirs: input of lipid biomarker for source assessment. *Journal of Lake Sciences*. 2024, 36(1): 137-148. DOI: 10.18307/2024.0126.[宿苧仁, Emilie Jardé, 尹月鹏等. 基于脂质生物标志物评估河道型水库表层沉积物有机质来源. 湖泊科学, 2024, 36(1): 137-148.]

[42] de Lima Sobrinho R, Da Costa Peçanha G, Martins De Souza T, et al. Evaluation of urban pollution in a tropical lacustrine ecosystem by using *n*-alkanes and sterols as biomarkers. *Environmental Pollution*. 2023, 316: 120567. DOI: 10.1016/j.envpol.2022.120567.

[43] 澎湃新闻. 滇池水质改善的“样板”草海如何炼成? https://www.thepaper.cn/newsDetail_forward_27561055.

[44] Wang Q, Gao XQ, Xiao NW, et al. Distribution pattern of submerged macrophytes and its influencing factors of water environment in Lake Dianchi. *Journal of Lake Sciences*. 2018, 30(1): 157-170. DOI: 10.18307/2018.0116.[王琦, 高晓奇, 肖能文等. 滇池沉水植物的分布格局及其水环境影响因子识别. 湖泊科学. 2018, 30(1): 157-170.]

[45] 吴秋菊. 云南省“湖泊革命”攻坚战背景下的滇池流域近40年土地利用变化合理性研究[学位论文]. 云南财经大学, 2023.

[46] Zhang HS, Jiao YM, Xu Q, et al. Research review on land use change in Dianchi Lake Basin and its impact on water quality. *Yangtze River*. 2023, 54(12): 65-73. DOI: 10.16232/j.cnki.1001-4179.2023.12.009.[张洪森, 角媛梅, 徐秋娥等. 滇池流域土地利用变化及其对水质影响研究综述. 人民长江. 2023, 54(12): 65-73.]

[47] Lazzari L, Wagener ALR, Boyle EA, et al. Sedimentary record of hydrocarbons and sewage inputs from a highly populated region in South-Eastern Brazil. Marine Pollution Bulletin. 2019, 149: 110565. DOI: 10.1016/j.marpolbul.2019.110565.

[48] Li JL, Luo CL, Lu H, et al. Spatio-temporal variation and driving factors of algal bloom at Lake Dianchi during 2002-2018. *Acta Ecologica Sinica*. 2023, 43(2): 878-891. DOI: 10.5846/stxb202110253002.[李加龙, 罗纯良, 吕恒等. 2002—2018年滇池外海蓝藻水华暴发时空变化特征及其驱动因子. 生态学报. 2023, 43(2): 878-891.]

[49] Shi FN, Yang H, Liu XW, et al. Spatial-temporal distribution of phytoplankton in Waihai of Dianchi lake and its nonlinear correlation analysis with environmental factors. *Acta Hydrobiologica Sinica*. 2022, 46(7): 1070-1079. DOI: 10.7541/2022.2021.0159.[施凤宁, 阳辉, 刘湘伟等. 滇池外海藻类时空分布及其与环境因素间非线性相关分析. 水生生物学报. 2022, 46(7): 1070-1079.]

[50] Song T, Xu C, Yan F, et al. Spatiotemporal dynamics monitoring of lake cyanobacterial blooms based on Sentinel-2 data. *Environmental Monitoring in China*. 2025, 41(1): 214-224. DOI: 10.19316/j.issn.1002-6002.2025.01.23.[宋挺, 徐超, 严飞等. 基于Sentinel-2数据的湖泊蓝藻水华时空动态监测. 中国环境监测. 2025, 41(1): 214-224.]

[51] Wen G, Wang R, Wen CC, et al. A review on the formation mechanism and in-situ control of freshwater dinoflagellate bloom. *China Environmental Science*. 2023, 43(5): 2239-2253. DOI: 10.3969/j.issn.1000-6923.2023.05.015.[文刚, 王茹, 温成成等. 淡水甲藻水华形成原因及原位控制研究进展. 中国环境科学. 2023, 43(5): 2239-2253.]